

**Sebastián Alberto Urrutia**

**Otimização em esportes:  
programação de tabelas e  
problemas de classificação**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**  
Programa de Pós-graduação em  
Informática

Rio de Janeiro  
Outubro de 2005



**Sebastián Alberto Urrutia**

**Otimização em esportes: programação de  
tabelas e problemas de classificação**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em In-  
formática do Departamento de Informática da PUC-Rio  
como parte dos requisitos parciais para obtenção Do título  
de Doutor em Informática

Orientador: Prof. Celso da Cruz Carneiro Ribeiro

Rio de Janeiro  
Outubro de 2005



**Sebastián Alberto Urrutia**

**Otimização em esportes: programação de  
tabelas e problemas de classificação**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Informática aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Celso da Cruz Carneiro Ribeiro**  
Orientador  
Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Edward Hermann Haeusler**  
PUC-RIO

**Prof. Guillermo Alfredo Durán**  
Universidad de Chile

**Prof. Jaime Luiz Szwarcfiter**  
UFRJ

**Prof. Luiz Satoru Ochi**  
UFF

**Prof. Nelson Maculan Filho**  
UFRJ

**Prof. Oscar Porto**  
PUC-RIO

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Outubro de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### Sebastián Alberto Urrutia

Graduou-se na Universidad de Buenos Aires (Buenos Aires, Argentina), cursando Ciências da Computação.

Ficha Catalográfica

Urrutia, Sebastián Alberto

Otimização em esportes: programação de tabelas e problemas de classificação/ Sebastián Alberto Urrutia; orientador: Celso da Cruz Carneiro Ribeiro. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2005.

v., 93 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática - Teses 2. Otimização combinatória 3. Otimização em esportes. 4. Programação de tabelas. 5. Problemas de classificação. 6. Metaheurísticas. 7. Programação inteira. I. Ribeiro, Celso da Cruz Carneiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

A Mario.

## Agradecimentos

À Anolan e Paulita pelo amor, carinho e compreensão dedicados a mim desde que nos conhecemos e por abrir mão de tanto tempo para que este trabalho pudesse ser concluído no prazo.

À minha mãe, pai, irmã, irmão e família por terem me incentivado a lutar por este sonho, mesmo sofrendo com minha ausência.

Ao meu orientador Professor Celso Carneiro Ribeiro, pelo apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos do Rio e aos de Buenos Aires pela amizade.

Aos meus colegas da PUC-Rio, que sempre me incentivaram a trabalhar nesta tese.

Ao professora Irene Loiseau, que me orientou a fazer o doutorado na PUC-RIO.

Aos funcionários do departamento de Informática, pela ajuda de todos os dias.

À CAPES, à FAPERJ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Urrutia, Sebastián Alberto ; Ribeiro, Celso da Cruz Carneiro. **Otimização em esportes: programação de tabelas e problemas de classificação**. Rio de Janeiro, 2005. 93p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O planejamento e a gestão de atividades esportivas é uma área promissora e pouco explorada para aplicações de Pesquisa Operacional. Os problemas nesta área são em geral de formulação simples e alcançam grande difusão nos meios de comunicação. Embora sua formulação seja simples, em geral estes problemas são difíceis de serem resolvidos em termos computacionais. Os resultados de muitos trabalhos acadêmicos nesta área têm sido aceitos como soluções para problemas reais e várias soluções vem sendo implementadas na prática.

Esta tese tem como objetivo principal estudar dois tipos de problemas que surgem na área de esportes: a programação de tabelas e os problemas da classificação.

A programação de tabelas para competições esportivas é uma tarefa difícil, na qual diversas técnicas de otimização combinatória têm sido aplicadas. Nesta tese, formula-se o Problema do Torneio com Viagens Espelhado como um problema de otimização em grafos. O problema é resolvido utilizando-se algoritmos aproximados. Apresentam-se duas heurísticas para este problema. A primeira é muito rápida e serve para fornecer soluções iniciais para a segunda, que é capaz de obter soluções de boa qualidade em tempos razoáveis. São deduzidos limites duais para um tipo particular de instâncias. Estes limites permitem provar a otimalidade das soluções obtidas heurísticamente para instâncias muito maiores do que as maiores instâncias resolvidas na literatura. Por último, é apresentado um modelo de programação linear inteira para o problema, ao qual são acrescentadas desigualdades válidas.

Os problemas da classificação visam obter condições, necessárias e suficientes, para a classificação de uma determinada equipe para as finais de um campeonato em relação ao número de pontos a ser obtido. São apresentados modelos de programação linear inteira que permitem resolver estes problemas no contexto do Campeonato Brasileiro de Futebol.

## Palavras-chave

Otimização combinatória, Otimização em esportes, Programação de tabelas, Problemas de classificação, Metaheurísticas, Programação inteira

## Abstract

Urrutia, Sebastián Alberto ; Ribeiro, Celso da Cruz Carneiro. **Optimization in sports: sport scheduling and qualification problems**. Rio de Janeiro, 2005. 93p. PhD. Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sports management is a very attractive and not very explored area for applications of Operations Research. Problems in this area use to have simple formulations and reach a big coverage by the media. Although their formulations are simple, in general these problems are difficult to be solved in computational terms. The results of many academic works in this area have been accepted as solutions for real problems and some solutions are being implemented.

This thesis has the main objective of studying two types of problems that appear in the sports area: the fixture creation and the qualification problems.

Fixture creation (also known as sport scheduling) for sport competitions is a difficult task, in which several combinatorial optimization techniques has been applied. In this thesis, the Mirrored Traveling Tournament Problem is formulated as a graph optimization problem. The problem is solved using approximation algorithms. Two heuristics are introduced for this problem. The first one is very fast and is used to supply initial solutions for the second one which is able to obtain high quality solutions in reasonable computation times. Dual limits are deduced for a particular type of instances. These limits allow to prove the optimality of the heuristically obtained solutions for instances that are much bigger than those solved in the literature. Finally, an integer programming model is introduced in which valid inequalities are added.

The qualification problems aim to obtain necessary and sufficient conditions for the playoffs qualification of a given team in terms of the number of points to be obtained. Integer programming models are introduced which allow solving these problems in the context of the Brazilian Football Championship.

## Keywords

Combinatorial Optimization, Optimization in sports, Sport scheduling, Qualification problems, Metaheuristics, Integer Programming

# Conteúdo

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Introdução   | 11 |
| 2   | Programação de Tabelas e o Problema do Torneio com Viagens     | 14 |
| 2.1 | Formalização do problema                                       | 16 |
| 2.2 | Fatoração de grafos  | 17 |
| 2.3 | O problema do torneio com viagens                              | 19 |
| 2.4 | O problema do torneio com viagens espelhado                    | 21 |
| 2.5 | Espaço de busca  | 22 |
| 3   | Heurísticas para o Problema do Torneio com Viagens Espelhado   | 24 |
| 3.1 | Uma heurística construtiva para o MTTP                         | 24 |
| 3.2 | Vizinhanças  | 29 |
| 3.3 | Busca local  | 34 |
| 3.4 | Heurística híbrida GRASP com ILS                               | 36 |
| 3.5 | Resultados computacionais                                      | 38 |
| 3.6 | Conclusões   | 42 |
| 4   | Minimização de Viagens em Torneios Round Robin                 | 44 |
| 4.1 | Conectando o número de quebras com a distância viajada         | 45 |
| 4.2 | Número máximo de quebras para torneios SRR                     | 46 |
| 4.3 | Número máximo de quebras para torneios DRR simples             | 50 |
| 4.4 | Limites superiores para o número de quebras para torneios MTTP | 50 |
| 4.5 | Resolução do MTTP em instâncias constantes                     | 55 |
| 4.6 | Conclusões   | 56 |
| 5   | Um Modelo de Programação Linear Inteira para o MTTP            | 57 |
| 5.1 | Modelo   | 58 |
| 5.2 | Desigualdades válidas  | 60 |
| 5.3 | Resultados computacionais                                      | 62 |
| 5.4 | Conclusões   | 67 |
| 6   | Os Problemas de Classificação: FutMax                          | 68 |
| 6.1 | Complexidade   | 70 |
| 6.2 | Formulação dos problemas                                       | 73 |
| 6.3 | Modelos de programação inteira                                 | 74 |
| 6.4 | Resultados   | 77 |
| 6.5 | Conclusões   | 81 |
| 7   | Conclusões   | 83 |
|     | Referências Bibliográficas                                     | 86 |

## Lista de Figuras

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Esquema da tese.  | 13 |
| 2.1 | Uma 1-fatoração orientada de $K_6$  | 18 |
| 3.1 | Método do polígono para $n = 6$ .   | 26 |
| 3.2 | Matriz de oponentes consecutivos para $n = 16$ .  | 27 |
| 3.3 | Movimento na vizinhança TA para $n = 8$ , onde a sede do jogo $\{3, 7\}$ é mudada.                                      | 29 |
| 3.4 | Movimento na vizinhança TE para $n = 6$ , onde as equipes 1 e 2 foram trocadas.   | 30 |
| 3.5 | Movimento na vizinhança TPR para $n = 8$ , onde os oponentes das equipes 2 e 3 em duas rodadas diferentes são trocados. | 32 |
| 4.1 | Conjunto HAP para um torneio SRR com seis equipes.  | 44 |
| 4.2 | Método do polígono para maximizar quebras em torneios SRR para $n = 6$ .  | 47 |
| 4.3 | Método do polígono para maximizar quebras em torneios SRR equilibrados para $n = 6$ .                                   | 49 |
| 4.4 | Um HAPC e seus dois correspondentes HAPs.   | 51 |
| 6.1 | Fluminense no Campeonato Brasileiro 2002.   | 80 |
| 6.2 | Palmeiras no Campeonato Brasileiro 2002.  | 81 |
| 6.3 | São Caetano no Campeonato Brasileiro 2002.  | 82 |

## Lista de Tabelas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Resultados computacionais obtidos pela heurística construtiva (1000 execuções).   | 39 |
| 3.2 | Resultados computacionais obtidos pela heurística GRILS-MTTP.   | 40 |
| 3.3 | Melhores resultados obtidos pela heurística GRILS-MTTP.   | 41 |
| 3.4 | GRASP vs. heurística GRILS-MTTP.  | 41 |
| 4.1 | Melhores soluções para instâncias constantes do MTTP.   | 55 |
| 5.1 | Resultados computacionais para a instância <i>circ4</i> (custo da solução ótima: 20).   | 64 |
| 5.2 | Resultados computacionais para a instância <i>n14</i> (custo da solução ótima: 8276).   | 64 |
| 5.3 | Resultados computacionais para a instância <i>circ6</i> (custo da solução ótima: 72).   | 65 |
| 5.4 | Resultados computacionais para a instância <i>n16</i> (custo da solução ótima: 26588).  | 65 |
| 5.5 | Valor da relaxação linear do modelo.  | 66 |
| 6.1 | Tempos de processamento para calcular <i>NCG</i> .  | 78 |
| 6.2 | (a) A tabela de classificação após a rodada 24 e (b) uma possível tabela de classificação ao final da etapa de classificação. | 79 |